

SKRIPSI

**SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN
PENGONTROLAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE*
(PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA**

Disusun oleh:

MUTMAINNAH TULHADAWIAH

D041201092



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

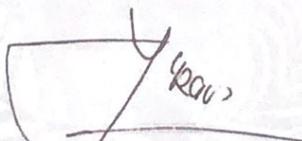
SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN PENGONTROLAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA

Disusun dan diajukan oleh

Mutmainnah Tulhadawiah
D041201092

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 20 November 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 197504042000121001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ing. Farzal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mutmainnah Tulhadawiah

NIM : D041201092

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN PENGONTROLAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kasamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk klarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh dalam proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 November 2024

Yang Menyatakan



Mutmainnah Tulhadawiah

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur tiada henti penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmah dan karunia-Nya. Shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada baginda nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Simulasi Filter Aktif Tiga Fasa Dengan Pengontrolan Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Reduksi Harmonisa”

Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini terwujud berkat bantuan arahan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Pua, Mama, saudara dan saudari, serta seluruh keluarga. Terimakasih untuk semua cinta dan kasih sayang yang tiada henti diberikan kepada penulis, untuk semua waktu dan tenaga dalam upaya memenuhi kebutuhan penulis, untuk doa yang tiada henti kiranya diberi kemudahan, untuk harapan yang selalu menjadi motivasi penulis, dan untuk dukungan yang tidak ada nilai tukarnya. Maaf untuk semua salah dan khilaf, untuk semua marah dan kecewa, untuk semua sedih dan khawatir, dan untuk harapan yang belum sesuai. Penulis akan selalu berusaha menjadi kebanggaan Pua dan Mama.
2. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan selama proses penelitian hingga proses penyusunan skripsi ini. Semoga ilmu yang telah Bapak berikan dapat menjadi bekal berharga bagi masa depan saya. Saya berharap Bapak selalu diberi kesehatan dan keberkahan setiap saat.
3. Ibu Dr. Ir. Zaenab, M.T. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T selaku dosen penguji atas waktu, perhatian, dan masukan yang sangat berharga selama proses ujian ini. Umpan balik dan masukan yang diberikan yang Ibu dan bapak berikan tidak hanya membantu saya dalam memperbaiki karya ini, tetapi juga memberikan wawasan yang lebih luas dan mendalam. Semoga ilmu yang telah

Ibu dan Bapak berikan senantiasa menjadi amal yang bermanfaat dan semoga segala kebaikan Ibu dan Bapak mendapat balasan yang berlimpah.

4. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A. Samman, IPU, ACPE, APEC Eng. dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Univeritas Hasanuddin.
5. Seluruh dosen pengajar, tenaga didik, laboran serta seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, serta bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
6. Yayasan Beasiswa Karya Salemba Empa atas kesempatan luar biasa untuk menjadi bagian dari beasiswa ini. Dukungan finansial yang sangat membantu serta pengalaman luar biasa dan bertemu dengan orang-orang hebat selama menjadi beswan menjadi salah satu pelajaran berharga yang pastinya sangat bermanfaat dan menjadi motivasi dalam meningkatkan potensi penulis.
7. M. Fajar Taufik yang telah menjadi teman, sahabat, saudara, dan partner yang baik, yang selalu siap direpotkan.terimakasih telah menjadi pendengar yang baik, dan pemberi saran yang bijak. Terimakasih telah menemani dan menenangkan. Apapun yang terjadi kedepannya, semoga hubungan baik terus kebersamai.
8. Sindy, Rani, Fajjah, Isti dan Muli yang telah menjadi tempat adu nasib masalah skripsi, yang selalu memberi motivasi dan dorongan untuk mengerjakan skripsi. Semoga selalu bisa saling menguatkan dan kebersamai. Semoga kita semua sukses dunia dan akhirat.
9. Seluruh teman-teman pengurus PKSE-UNHAS periode 2023-2024 dan seluruh teman-teman beswan KSE Unhas batch 8. Terimakasih telah kebersamai selama menjadi beswan. Terimakasih untuk setiap dukungan dan motivasi yang sangat berarti. Terimakasih telah mewarnai masa perkuliahan.
10. Seluruh teman-teman PROCEZ20R yang telah menjadi teman seperjuangan, memberi banyak pengalaman dan pelajaran yang kemudian penulis jadikan motivasi. Terimakasih untuk suka dan dukanya, untuk setiap proses selama menjadi mahasiswa Teknik Unhas. Terimakasih telah mewarnai masa perkuliahan.

11. Yang terakhir, kepada diri ku sendiri, Mutmainnah Tulhadawiah. Terimakasih untuk tidak menyerah sampai saat ini. Terimakasih telah sabar dalam menghadapi proses dan tidak berhenti bermimpi. Terimakasih telah memilih maju, belajar dan berkembang. Terimakasih sudah melakukan yang terbaik, meski kadang hasilnya belum sesuai harapan. Teruslah percaya bahwa kamu bisa.

Semoga Allah SWT membalas semua pihak yang turut andil dalam penyelesaian skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini kedepannya.

ABSTRAK

MUTMAINNAH TULHADAWIAH. *Simulasi Filter Aktif Tiga Fasa Dengan Pengontrolan Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Reduksi Harmonisa (dibimbing oleh Yusran)*

Permintaan akan daya listrik yang efisien terus meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Namun, penggunaan peralatan non-linear seperti konverter daya, motor, dan lampu LED menyebabkan peningkatan harmonisa dalam jaringan listrik, yang dapat menurunkan efisiensi sistem serta merusak peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat pemodelan rangkaian Listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengendali PID untuk reduksi harmonisa, mengetahui bagaimana menentukan parameter-parameter pengendali, serta mengetahui bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengendali PID. Filter aktif dengan topologi inverter sumber tegangan (VSI) digunakan sebagai solusi untuk mengeliminasi harmonisa dengan menghasilkan arus sinusoidal berlawanan fasa. Arus referensi ($I_{abc-ref}$) diperoleh dari teori pq dan dibandingkan dengan arus sumber menggunakan regulator arus linier. Pengendali PID menjaga tegangan DC-link tetap stabil untuk mengkompensasi arus harmonik, dengan parameter tuning menggunakan metode Ziegler-Nichols. Penggunaan filter aktif 3 fasa mampu mereduksi harmonisa tegangan dan arus sumber hingga tidak lagi melewati batas standar juga mampu meningkatkan faktor daya pada sistem. Penggunaan Pengontrolan PID tidak menurunkan THD tegangan maupun arus sumber, hanya meningkatkan faktor daya pada sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa THD tegangan sebelum pemasangan filter aktif adalah 10,43%, 13,95%, dan 11,30%. Setelah pemasangan filter aktif adalah THD tegangan menjadi 4,30%, 2,15%, dan 2,37%. Sedangkan setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrol PID, THD tegangan menjadi 0,35%; 0,55%; dan 0,55%. THD arus sebelum filter aktif adalah 25,15%, 25,76%, dan 27,07%. Setelah pemasangan filter aktif, THD tegangan menjadi 4,67%, 2,19%, dan 2,50%. Sedangkan setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrol PID, THD tegangan menjadi 0,35%; 0,55%; dan 0,55%. Faktor daya sistem meningkat dari 0,866 menjadi 0,954 setelah pemasangan filter aktif.

Kata Kunci: Filter aktif, Harmonisa, Pengontrolan PID, THD, Faktor daya

ABSTRACT

MUTMAINNAH TULHADAWIAH. *Simulation of a Three-Phase Active Filter with Proportional Integral Derivative (PID) Control for Harmonic Reduction (supervised by Yusran)*

The demand for efficient electrical power has steadily increased over the past decades. However, the use of non-linear equipment such as power converters, motors, and LED lights has led to an increase in harmonics within the power grid, which can reduce system efficiency and damage equipment. This study aims to model a three-phase electrical circuit using a three-phase active filter with PID control for harmonic reduction, determine the parameters of the controller, and compare harmonics in systems without active filters, systems using active filters, and systems using active filters with PID controllers. An active filter with a voltage source inverter (VSI) topology is used as a solution to eliminate harmonics by generating sinusoidal currents in opposite phases. The reference current ($I_{abc-ref}$) is obtained from the pq theory and compared with the source current using a linear current regulator. The PID controller stabilizes the DC-link voltage to compensate for harmonic currents, with parameter tuning performed using the Ziegler-Nichols method. The use of a three-phase active filter effectively reduces voltage and current harmonics to within standard limits and improves the system's power factor. However, the PID control does not reduce the Total Harmonic Distortion (THD) of voltage or current but only enhances the power factor. Simulation results indicate that the voltage THD before installing the active filter was 10.43%, 13.95%, and 11.30%. After installing the active filter, the voltage THD was reduced to 4.30%, 2.15%, and 2.37%. When the active filter was equipped with PID control, the voltage THD further decreased to 0.35%, 0.55%, and 0.55%. The current THD before the active filter was 25.15%, 25.76%, and 27.07%. After installing the active filter, the current THD was reduced to 4.67%, 2.19%, and 2.50%. When the active filter was equipped with PID control, the current THD reached 0.35%, 0.55%, and 0.55%. The system's power factor improved from 0.866 to 0.954 after installing the active filter.

Keywords: *Active filter, Harmonics, PID Control, THD, Power factor*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	I
ABSTRAK	VI
ABSTRACT	VII
DAFTAR ISI.....	VIII
DAFTAR GAMBAR	X
DAFTAR TABEL	XII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Harmonisa Sistem Tenaga Listrik	6
2.2.1 Sumber-sumber harmonisa.....	7
2.2.2 Indeks harmonik umum.....	9
2.2.3 Standar harmonisa	11
2.2.4 Pengaruh harmonisa pada sistem	15
2.3 Filter Aktif Sebagai Filter Harmonisa	16
2.3.1 Teori PQ	20
2.4 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID).....	22
2.5 Matlab <i>Simulink</i>	29
2.6 Penelitian Terkait yang Terdahulu.....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	34
3.2 Alat dan Bahan	34
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.4 Teknik Pengumpulan Data	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Pemodelan Sistem Rangkaian 3 Fasa dengan Beban Non-Linear	37
4.2 Pemodelan Rangkaian Filter Aktif 3 Fasa.....	39
4.3 Pemodelan Pengontrolan PID	46
4.4 Parameter Penyusun Rangkaian Simulasi	49
4.5 Hasil Simulasi	49
4.5.1 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear	49
4.5.2 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa.....	58

4.5.3 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID.....	67
4.6 Perbandingan Hasil Simulasi	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	89
5.1 Kesimpulan	89
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA.....	91
LAMPIRAN.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem 3 fasa.....	5
Gambar 2 Distorsi arus akibat beban nonlinear	7
Gambar 3 Filter aktif (a) seri, (b) paralel	16
Gambar 4 Rangkaian ekivalen sumber harmonik dan filter aktif	16
Gambar 5 Filter aktif <i>low-pass</i>	18
Gambar 6 Respon frekuensi filter <i>low-pass</i>	18
Gambar 7 Filter aktif <i>high-pass</i>	18
Gambar 8 Respon frekuensi filter <i>high-pass</i>	19
Gambar 9 Filter aktif <i>band-pass</i>	19
Gambar 10 Respon frekuensi filter <i>band-pass</i>	19
Gambar 11 Ilustrasi dari transformasi abc to $\alpha\beta$	21
Gambar 12 Respon proses sebagai akibat perubahan <i>setpoint</i>	24
Gambar 13 Diagram blok kontrol PID ideal	25
Gambar 14 Aksi kontrol PID.....	26
Gambar 15 Diagram blok alternatif kontrol PID	26
Gambar 16 Metode respons langkah dan frekuensi Ziegler–Nichols.	27
Gambar 17 Aplikasi matlab.....	29
Gambar 18 Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 19 Diagram pemodelan sistem di aplikasi matlab <i>simulink</i>	36
Gambar 20 Rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear.....	34
Gambar 21 Rangkaian 3 fasa beban non-linear dengan filter aktif 3 fasa	39
Gambar 22 Blok diagram algoritma teori pq	41
Gambar 23 <i>Transformasi clark abc to $\alpha\beta$</i> menggunakan matlab <i>simulink</i>	42
Gambar 24 Gelombang output <i>transformasi clark abc to $\alpha\beta$</i> menggunakan matlab <i>simulink</i>	42
Gambar 25 Perhitungan daya aktif (p) dan daya reaktif (q) menggunakan blok pada matlab <i>simulink</i>	44
Gambar 26 Perhitungan arus referensi daya aktif (p) dan daya reaktif (q) menggunakan blok pada matlab <i>simulink</i>	45
Gambar 27 <i>Inverse transformasi clark $\alpha\beta$ to abc</i> menggunakan matlab <i>simulink</i>	46
Gambar 28 Rangkaian <i>Linier current regulator</i>	46
Gambar 29 Diagram blok algoritma pq dengan pengontrolan PID	47
Gambar 30 Rangkaian simulasi tuning pengontrolan PID.....	47
Gambar 31 Gelombang keluaran ketika nilai $Kp = 0,043$	48
Gambar 32 Gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear	49
Gambar 33 Zoom gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear	50
Gambar 34 Spektrum THDv fasa R tanpa filter.....	50
Gambar 35 Spektrum THDv fasa S tanpa filter	51
Gambar 36 Spektrum THDv fasa T tanpa filter	51
Gambar 37 Spektrum THDi fasa R tanpa filter.....	54

Gambar 38 Spektrum THDi fasa S tanpa filter	55
Gambar 39 Spektrum THDi fasa T tanpa filter	55
Gambar 40 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	58
Gambar 41 <i>Zoom</i> gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	59
Gambar 42 Gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	59
Gambar 43 <i>Zoom</i> gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	59
Gambar 44 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	60
Gambar 45 Spektrum THDv fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	61
Gambar 46 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	61
Gambar 47 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	64
Gambar 48 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	64
Gambar 49 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	65
Gambar 50 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	68
Gambar 51 <i>Zoom</i> gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	68
Gambar 52 Gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	69
Gambar 53 <i>Zoom</i> gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	69
Gambar 54 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	70
Gambar 55 Spektrum THDv Fasa S Setelah Pemasangan Filter Aktif 3 Fasa Dengan Pengontrolan Pid.....	70
Gambar 56 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	71
Gambar 57 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	74
Gambar 58 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	74
Gambar 59 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	75
Gambar 60 Grafik Perbandingan IHD tegangan (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T...85	
Gambar 61 Grafik Perbandingan IHD arus (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T.....88	

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Batas distorsi tegangan harmonik dalam persen dari tegangan frekuensi fundamental nominal	11
Tabel 2 Batas arus harmonik	12
Tabel 3 Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individu dalam jaringan publik tegangan rendah menurut IEC 61000-2-2	12
Tabel 4 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas A	14
Tabel 5 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas C	14
Tabel 6 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas D	14
Tabel 7 Batasan arus harmonik menurut IEC 61000-3-4	15
Tabel 8 Pengaruh tuning salah satu parameter PID terhadap unjuk kerja proses ..	24
Tabel 9 Aturan penyetelan Ziegler–Nichols	28
Tabel 10 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan	32
Tabel 11 Nilai K_p , T_i , dan T_d dengan metode tuning Ziegler-Nichols	48
Tabel 12 Parameter penyusun rangkaian simulasi	49
Tabel 13 THD tegangan sumber tanpa filter aktif	52
Tabel 14 THD arus sumber tanpa filter aktif	56
Tabel 15 Hasil pengukuran rangkaian tanpa filter aktif	58
Tabel 16 THD tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	62
Tabel 17 THD arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	65
Tabel 18 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	67
Tabel 19 THD tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	71
Tabel 20 THD arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID	75
Tabel 21 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrolan PID	77
Tabel 22 <i>Voltage distortion limits</i>	78
Tabel 23 <i>Current distortion limits for system 120 V through 69 kV</i>	78
Tabel 24 Perbandingan THD hasil simulasi	79
Tabel 25 Perbandingan IHD hasil simulasi	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas sistem tenaga listrik merujuk pada kemampuan sistem untuk menyediakan daya yang andal, stabil, dan efisien kepada konsumen. Hal ini mencakup kestabilan frekuensi, tegangan, dan kualitas faktor daya. Namun, perkembangan teknologi dan meningkatnya penggunaan peralatan modern yang bersifat nonlinier seperti konverter daya, motor listrik, dan perangkat berbasis mikroprosesor telah menimbulkan masalah pada kualitas daya, terutama karena munculnya harmonisa.

Harmonisa mengakibatkan distorsi pada bentuk gelombang sinusoidal arus dan tegangan, yang disebabkan oleh beban-beban nonlinier. Dampak dari harmonisa ini meliputi penurunan efisiensi sistem, kerusakan peralatan, penurunan umur peralatan, hingga gangguan pada sistem elektronik sensitif. Distorsi gelombang sinusoidal ini dapat memicu resonansi dalam jaringan listrik, menurunkan efisiensi penyaluran energi, dan mengurangi umur isolasi serta peralatan listrik. Salah satu solusi untuk mengatasi harmonisa adalah dengan memasang filter harmonisa.

Filter harmonisa terbagi menjadi dua jenis, yaitu filter pasif dan filter aktif. Filter pasif biasanya digunakan karena harganya lebih murah, namun memiliki keterbatasan dalam mengatasi frekuensi harmonisa tertentu. Di sisi lain, filter aktif menggunakan teknologi yang lebih canggih dengan kontrol arus atau tegangan yang lebih fleksibel. Filter aktif juga tidak menimbulkan resonansi dan dapat meningkatkan faktor daya sistem.

Dalam konteks ini, metode kontrol PID (Proporsional-Integral-Derivatif) menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan untuk mengoptimalkan kinerja filter aktif. Kontrol PID dikenal karena desainnya yang relatif sederhana dan tidak memerlukan banyak sensor. Salah satu kelebihan utama dari kontrol PID adalah kemampuan untuk menjaga modulasi frekuensi *switching* yang konstan, yang pada gilirannya membuat sistem kontrol lebih stabil dan mudah diterapkan. Dengan pengaturan yang tepat, kontrol PID dapat membantu filter aktif merespons

harmonisa yang fluktuatif dan mengurangi dampaknya terhadap sistem tenaga listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan filter aktif tiga fase yang dikendalikan dengan metode kontrol PID menggunakan MATLAB *Simulink*. Simulasi ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas filter aktif dalam mengatasi harmonisa yang disebabkan oleh beban nonlinier pada jaringan listrik. Dengan menggunakan kontrol PID, diharapkan filter aktif dapat berfungsi lebih optimal dalam mengurangi distorsi harmonisa, meningkatkan efisiensi sistem, serta memperpanjang umur peralatan listrik. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan efektif dalam menjaga kualitas daya pada sistem tenaga listrik, khususnya dalam menghadapi tantangan harmonisa yang semakin kompleks akibat perkembangan teknologi dan penggunaan peralatan modern yang lebih canggih.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pemodelan rangkaian listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID untuk reduksi harmonisa?
2. Bagaimana menentukan parameter-parameter pengontrolan PID dengan metode tuning Zieger-Nichlos?
3. Bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengontrolan PID?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, tujuan penelitian ini adalah:

1. Membuat pemodelan rangkaian Listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengendali PID untuk reduksi harmonisa.
2. Mengetahui bagaimana menentukan parameter-parameter pengendali PID

3. Mengetahui bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengendali PID.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan acuan dalam pengembangan filter aktif 3 fasa dengan sistem pengendali yang sederhana untuk mengatasi permasalahan harmonisa pada sistem tenaga listrik.

1.5 Ruang Lingkup

Pada penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Data simulasi diperoleh dari data penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini.
2. Menggunakan konfigurasi parallel atau filter aktif *Shunt*.
3. Beban yang digunakan sebagai sumber arus harmonisa adalah *rectifier* 3 fasa.
4. Menggunakan *inverter* 3 fasa sebagai filter aktif 3 fasa
5. Hanya menggunakan pengontrolan PID.
6. Metode tuning kontrol PID yang digunakan adalah metode Zieger-Nichlos.
7. Pemodelan sistem filter aktif 3 fasa dengan kontrol PID dan simulasinya menggunakan *software* Matlab *Simulink*.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian meliputi Sistem tenaga Listrik, Harmonisa, filter aktif, pengontrolan PID serta *Software* Matlab *Simulink*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, diagram alir penelitian, rancangan sistem serta Teknik pengumpulan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai hasil pemodelan sistem dan hasil simulasi sistem menggunakan Matlab *Simulink* serta Analisa perbandingan tiap simulasi yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

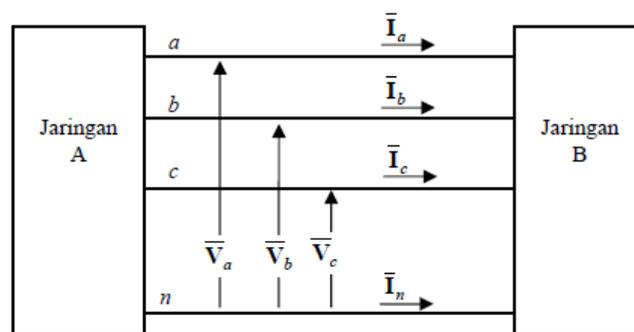
Bab ini memuat simpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sebuah sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai berikut: Sebuah sistem tenaga listrik adalah jaringan dari komponen-komponen yang saling terhubung yang dirancang untuk secara kontinu mengubah energi non-elektrik menjadi bentuk listrik; mengangkut energi listrik melalui jarak yang mungkin jauh; mengubah energi listrik menjadi bentuk tertentu yang tunduk pada toleransi yang ketat; dan mengubah energi listrik menjadi bentuk non-elektrik yang dapat digunakan. (Sudirman, 2012)

Agar dapat diimplementasikan, sistem ini harus aman, dapat diandalkan, ekonomis, ramah lingkungan, dan secara sosial dapat diterima. Sistem tenaga dapat dipandang terdiri dari beberapa subsistem, yaitu: Pembangkit, Saluran Transmisi, Saluran Distribusi, dan Beban. Tujuan dibangunnya suatu sistem tenaga adalah untuk mencatu energi ke beban yang berupa peralatan-peralatan yang mengubah energi listrik menjadi bentuk energi yang sesuai dengan kebutuhan pengguna. Jenis peralatan sangat beragam, ada yang statis, ada yang berputar, ada pula yang merupakan gabungan statis dan berputar.



Gambar 1 Sistem 3 fasa
Sumber: Sudirman, 2012

Sistem tiga-fasa adalah sistem multifasa yang paling sederhana dapat dilihat pada Gambar. 1. Dengan urutan positif abc, tegangan-tegangan fasa adalah:

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_{an} &= \bar{V}_a = V_f \angle 0^\circ \\
 \bar{V}_{bn} &= \bar{V}_b = V_f \angle -120^\circ \\
 \bar{V}_{cn} &= \bar{V}_c = V_f \angle -240^\circ = \bar{V}_{cn} = \bar{V}_c = V_f \angle +120^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Tegangan fasa-fasa adalah:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b = V_f \sqrt{3} \angle 30^\circ \\ \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b - \bar{V}_c = V_f \sqrt{3} \angle -90^\circ \\ \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c - \bar{V}_a = V_f \sqrt{3} \angle 150^\circ\end{aligned}\quad (2)$$

Dalam sistem tiga-fasa seimbang, besar tegangan adalah sama di semua fasa dan antar fasa yang berurutan terdapat beda fasa 120° . Demikian pula halnya dengan arus; keadaan ini membuat arus di penghantar netral bernilai nol. Tidak demikian dengan keadaan tak seimbang; tegangan dan arus setiap fasa tidak sama dan beda fasa antar tegangan fasa-netral tidak 120° . (Sudirman, 2012)

2.2 Harmonisa Sistem Tenaga Listrik

Istilah "harmonisa" berasal dari bidang akustik, di mana ia terkait dengan getaran sebuah senar atau kolom udara pada frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar. Komponen harmonik dalam sistem daya AC didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang memiliki frekuensi sama dengan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar sistem. Harmonisa dalam gelombang tegangan atau arus kemudian dapat dipahami sebagai komponen sinusoidal yang sempurna dengan frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar:

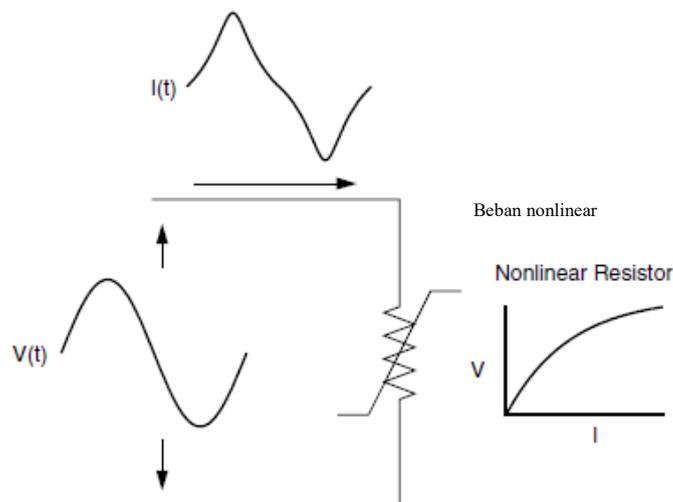
$$f_h = h \times \text{Frekuensi dasar (fundamental frequency)} \quad (3)$$

Dimana h adalah bilangan bulat. (Rosa, 2006)

Harmonisa dalam sistem tenaga didefinisikan sebagai tegangan dan arus sinusoidal pada frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi utama yang dihasilkan. Mereka merupakan komponen distorsi utama dari bentuk gelombang tegangan jaringan dan arus beban (Arrillaga & Watson, 2003). Sistem tenaga dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 atau 60 Hz. Namun, jenis beban tertentu menghasilkan arus dan tegangan dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental 50 atau 60 Hz. Frekuensi yang lebih tinggi ini merupakan bentuk polusi listrik yang dikenal sebagai harmonisa sistem tenaga. (Grady, 2012)

2.2.1 Sumber-sumber harmonisa

Distorsi harmonik disebabkan oleh perangkat non-linear dalam sistem tenaga. Sebuah perangkat non-linear adalah salah satu di mana arus tidak berbanding lurus dengan tegangan yang diterapkan. Gambar 2 menggambarkan konsep ini dengan kasus tegangan sinusoidal yang diterapkan pada resistor non-linear sederhana di mana tegangan dan arus bervariasi sesuai dengan kurva yang ditunjukkan. Sementara tegangan yang diterapkan adalah sempurna sinusoidal, arus yang dihasilkan terdistorsi. Meningkatkan tegangan beberapa persen dapat menyebabkan arus menjadi dua kali lipat dan mengambil bentuk gelombang yang berbeda. Ini adalah sumber distorsi harmonik utama dalam sebuah sistem tenaga. (Dugan et al., 2002)



Gambar 2 Distorsi arus akibat beban nonlinear
Sumber: Dugan et al

Beban non-linear adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Hal ini disebabkan karena adanya komponen semikonduktor yang mana dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Selain itu harmonisa dapat juga ditimbulkan oleh peralatan penyearah khususnya peralatan yang menggunakan penyearah dioda dan thyristor. Dalam pemakaian konverter sebagai sumber daya listrik dapat membawa suatu kerugian pada jaringan listrik yang merusak bentuk gelombang tegangan dan

arus bolak-balik sehingga tidak merupakan gelombang sinus murni. (Aini & Mar'i, 2021)

Beban non-linear adalah beban di mana gelombang arus tidak menyerupai gelombang tegangan yang diterapkan karena sejumlah alasan, misalnya, penggunaan sakelar elektronik yang menghantarkan arus beban hanya selama sebagian dari periode frekuensi daya. Oleh karena itu, kita dapat menganggap beban non-linear sebagai beban di mana Hukum Ohm tidak dapat menjelaskan hubungan antara V dan I . Di antara beban non-linear yang paling umum dalam sistem tenaga adalah semua jenis perangkat penyearah seperti yang ditemukan dalam konverter daya, sumber daya, unit pasokan daya tak terputus (UPS), dan perangkat busur seperti tungku listrik dan lampu neon. (Rosa, 2006). Sumber harmonik dalam sistem tenaga berbentuk. (Grady, 2012) (Scheidiger, 2013) (Dugan, 2002):

- a) Transformator, transformator daya dirancang untuk beroperasi pada atau sedikit melewati bagian bengkok kurva saturasi material inti. Arus magnetisasi yang dihasilkan sedikit berpuncak dan kaya akan harmonik.
- b) Mesin berputar (harmonisa gulungan), mesin beroperasi dengan kerapatan fluks puncak di luar bengkok saturasi. Kecuali diblokir oleh transformasi delta, sebuah generator sinkron tiga fasa akan menghasilkan arus harmonik ketiga sebesar 30%. Ada variasi yang signifikan di antara motor satu fasa dalam jumlah harmonik arus yang mereka hasilkan. Sebagian besar dari mereka memiliki I_{THD} dalam kisaran 10%, didominasi oleh harmonik ke-3.
- c) Perangkat elektronik daya (topologi, modulasi), Peningkatan penggunaan perangkat elektronik daya untuk pengendalian peralatan dan sistem daya telah menjadi alasan meningkatnya kekhawatiran tentang distorsi gelombang belakangan ini. Sebuah konverter elektronik daya dapat dilihat sebagai matriks dari saklar statis yang menyediakan interkoneksi fleksibel antara simpul masukan dan keluaran dari sistem tenaga listrik.

Penggunaan yang semakin meningkat dari pengondisi daya (power conditioners), di mana parameter seperti tegangan dan frekuensi bervariasi untuk beradaptasi dengan proses industri dan komersial tertentu, telah membuat konverter daya menjadi sumber harmonik yang paling umum di sistem distribusi. Pengalihan elektronik membantu dalam proses penyearahan daya AC 50/60 Hz menjadi daya

DC. Dalam aplikasi DC, tegangan dapat diubah dengan menyesuaikan sudut penyalan perangkat switching elektronik. Pada dasarnya, dalam proses penyearahan, arus hanya diizinkan mengalir melalui perangkat semikonduktor selama sebagian kecil siklus frekuensi dasar, sehingga konverter daya sering dianggap sebagai perangkat hemat energi.

Arus beban penyearah gelombang persegi digambarkan oleh deret fourier sebagai himpunan arus harmonik. Dalam kasus penyearah tiga fasa, komponennya adalah harmonik fundamental, dan harmonik ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 (dan seterusnya). Triple-n dieliminasi. Setiap harmonisa arus dianalisis secara independen dalam analisis kualitas daya. Triple-n adalah harmonik dengan angka 3, 9, dan seterusnya. (Alexander & Marc, 2007)

Konverter dapat dikelompokkan ke dalam kategori berikut:

1. Konverter daya besar seperti yang digunakan di industri peleburan logam dan di sistem transmisi HVDC
2. Konverter daya ukuran sedang seperti yang digunakan di industri manufaktur untuk pengendalian kecepatan motor dan di industri perkeretaapian
3. Penyearah daya kecil yang digunakan pada perangkat hiburan rumah tangga, termasuk TV dan komputer pribadi. Pengisi daya baterai adalah contoh lain dari konverter daya kecil

2.2.2 Indeks harmonik umum

Dalam menganalisa harmonic terdapat beberapa parameter penting untuk menggambarkan efek harmonik pada komponen sistem tenaga, yaitu *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *Total harmonic Distortion* (THD). IHD merupakan perbandingan antara nilai arus atau tegangan harmonik orde ke-h terhadap nilai arus atau tegangan fundamental. Nilai IHD untuk harmonik arus dan tegangan pada orde ke-h didefinisikan sebagai berikut:

$$IHD_i = \sqrt{\frac{I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (4)$$

dan

$$IHD_v = \sqrt{\frac{V_h^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (5)$$

dengan:

- IHD = Distorsi harmonisa individu (%)
- I_h = Arus harmonisa pada orde ke- h (A)
- V_h = Tegangan harmonisa pada orde ke- h (V)
- I_1 = Arus fundamental (A)
- V_1 = Tegangan fundamental (V)

Indeks harmonik yang paling umum, yang berkaitan dengan bentuk gelombang tegangan, adalah Total Harmonic Distortion (THD) merupakan nilai total persentase arus atau tegangan, ini merupakan perbandingan nilai arus atau tegangan komponen harmonisa terhadap nilai arus dan tegangan pada frekuensi fundamental. THD (*Total Harmonic Distortion*), yang didefinisikan sebagai nilai *root mean square* (r.m.s.) dari harmonik yang dinyatakan sebagai persentase dari komponen fundamental, yaitu;

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (6)$$

di mana V_n adalah tegangan r.m.s. tunggal pada frekuensi harmonik n , N adalah urutan harmonik maksimum yang akan dipertimbangkan, dan V_1 adalah tegangan r.m.s. fundamental dari garis ke netral. Untuk sebagian besar aplikasi, sudah cukup untuk mempertimbangkan rentang harmonik dari 2 hingga 25, tetapi kebanyakan standar menentukan hingga 50. (Arrillaga & Watson, 2003) (Aini & Mar'i, 2021)

Tingkat distorsi arus juga dapat dikarakteristikkan oleh nilai THD, tetapi ini bisa menyesatkan ketika arus beban fundamental rendah. Nilai THD yang tinggi untuk arus masukan mungkin tidak menjadi perhatian yang signifikan jika beban ringan, karena magnitudo arus harmoniknya rendah, meskipun distorsi relatifnya terhadap frekuensi fundamental tinggi. Untuk menghindari ambiguitas tersebut, faktor distorsi permintaan total (TDD) digunakan sebagai gantinya, yang didefinisikan sebagai:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_R} \quad (7)$$

Faktor ini mirip dengan THD kecuali bahwa distorsi diungkapkan sebagai persentase dari magnitudo arus beban tertentu yang dinilai atau maksimum, daripada sebagai persentase dari arus fundamental. Karena sistem pasokan listrik dirancang untuk menahan arus beban tertentu yang dinilai atau maksimum, dampak distorsi arus pada sistem akan lebih realistis jika penilaian didasarkan pada nilai-nilai yang dirancang, daripada pada referensi yang berfluktuasi dengan tingkat beban. (Arrillaga & Watson, 2003)

2.2.3 Standar harmonisa

Ada berbagai organisasi di tingkat nasional dan internasional yang bekerja sama dengan insinyur, produsen peralatan, dan Lembaga penelitian untuk mengembangkan standar yang mengatur pedoman, praktik yang direkomendasikan, dan batas harmonik. (Dugan et al., 2002)

2.2.3.1 IEEE Standard 519-1992

Berdasarkan IEEE Standard 519-1992, batas standar harmonisa untuk tegangan dan arus dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2;

Tabel 1 Batas distorsi tegangan harmonik dalam persen dari tegangan frekuensi fundamental nominal

Bus voltage at PCC, V_n(kV)	Individual harmonic voltage distortion (%)	Total voltage distortion, THDV_n(%)
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

Sumber: Dugan et al., 2002

Tabel 2 Batas arus harmonik

Shor-circuit ratioat PCC	Maximum individual frequency voltage harmonic (%)	Related assumption
10	2.5-3.0	Sistem khusus
20	2.0-2.5	1-2 pelanggan besar
50	1.0-1.5	Beberapa pelanggan relatif besar
100	0.5-1.0	5-20 Pelanggan sedang
1000	0.05-0.10	Banyak pelanggan kecil

Sumber: Dugan et al., 2002

2.2.3.2 IEC 61000-2-2

IEC 61000-2-2 mendefinisikan tingkat kompatibilitas untuk gangguan yang dihantarkan dengan frekuensi rendah dan sinyal dalam sistem pasokan daya rendah tegangan masyarakat seperti sistem satu fasa dan tiga fasa dengan tegangan nominal hingga 240 dan 415 V, secara berturut-turut. Tingkat kompatibilitas didefinisikan secara empiris sehingga mengurangi jumlah keluhan terhadap pengoperasian yang salah menjadi tingkat yang dapat diterima. Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individual dalam jaringan tegangan rendah ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individu dalam jaringan publik tegangan rendah menurut IEC 61000-2-2

Not multiple of 3		Multiple of 3		Even order h	Harmonic voltage (%)
Odd order h	Harmonic voltage (%)	Odd order h	Harmonic voltage (%)		
6	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.2
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3 \times 25/h$				

*Total Harmonic Distortion (THD) dari tegangan pasokan termasuk semua harmonik hingga urutan ke-40 harus kurang dari 8 persen.

Sumber: Dugan et al., 2002

2.2.3.3 IEC 61000-3-2 dan 61000-3-4

IEC 61000-3-2 dan 61000-3-4 keduanya menetapkan batas untuk emisi arus harmonik dari peralatan yang menarik arus masukan hingga dan termasuk 16 A per fase dan lebih dari 16 A per fase, secara berturut-turut. Standar ini ditujukan untuk membatasi emisi harmonik dari peralatan yang terhubung ke jaringan publik tegangan rendah sehingga kepatuhan terhadap batas-batas tersebut memastikan bahwa tegangan dalam jaringan publik memenuhi batas kompatibilitas yang didefinisikan dalam IEC 61000-2-2. (Dugan et al., 2002)

IEC 61000-3-2 adalah hasil dari IEC 555-2 (EN 60555-2). Standar mengklasifikasikan peralatan menjadi empat kategori (Dugan et al., 2002)

- a) Kelas A: Peralatan tiga fasa seimbang dan semua peralatan lainnya yang tidak termasuk ke dalam kelas B, C, dan D.
- b) Kelas B: Alat-alat portabel
- c) Kelas C: Peralatan pencahayaan termasuk perangkat pengatur kecerahan
- d) Kelas D: Peralatan yang memiliki arus masukan dengan "bentuk gelombang khusus" dan daya masukan aktif kurang dari 600 W

Batasan arus harmonik maksimum untuk kelas A, B, C, dan D diberikan dalam amper aktual yang diukur pada arus masukan peralatan. Perlu diperhatikan bahwa batasan arus harmonik untuk peralatan kelas B adalah 150 persen dari yang ada di kelas A. Batasan arus harmonik sesuai dengan IEC 61000-3-2 ditunjukkan dalam Tabel 4 hingga 6. Perhatikan bahwa batasan arus harmonik untuk peralatan kelas D ditentukan dalam angka absolut dan dalam nilai relatif terhadap daya aktif. Batasan ini hanya berlaku untuk peralatan yang beroperasi pada daya masukan hingga 600 W. (Dugan et al., 2002)

Tabel 4 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas A

Odd order h	Max. permissible harmonic current order (A)	Even Order h	Max. permissible order (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4	8-40	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
15-39	$0.15 \times 15/h$		

Tabel 5 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas C

Harmonic order h	Max. permissible harmonic current* (%)
2	2
3	$30 \times$ circuit power factor
5	10
7	7
9	5
11-39	3

* Persentase dari arus input fundamental.

Sumber: Dugan et al., 2002

Tabel 6 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas D

Harmonic order h	Max. permissible harmonic current	
	Per warr (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.50	0.40
13	0.35	0.33
11-39	$3.86/h$	$0.15 \times 15/h$

Sumber: Dugan et al., 2002

IEC 61000-3-4 membatasi emisi dari peralatan yang menarik arus masukan lebih besar dari 16 A dan hingga 75 A. Koneksi dari jenis peralatan ini tidak memerlukan persetujuan dari utilitas. Batasan arus harmonik berdasarkan standar ini ditunjukkan dalam Tabel 7;

Tabel 7 Batasan Arus Harmonik Menurut IEC 61000-3-4

Harmonic order <i>h</i>	Max. permissible harmonic current* (%)	Harmonic order <i>h</i>	Max. permissible harmonic current* (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

* Persentase dari arus input fundamental.

Sumber: Dugan et al., 2002

2.2.4 Pengaruh harmonisa pada sistem

Efek utama dari harmonik tegangan dan arus dalam sistem listrik adalah (Arrillaga & Watson, 2003):

1. Kemungkinan terjadinya peningkatan level harmonik akibat dari resonansi seri dan paralel.
2. Penurunan efisiensi dalam pembangkitan, transmisi, dan pemanfaatan energi listrik.
3. Penuaan isolasi komponen pembangkit listrik yang mengakibatkan pemendekan masa manfaatnya.
4. Tidak berfungsinya sistem atau komponen pabrik,

Di antara kemungkinan dampak eksternal dari harmonik adalah penurunan kinerja sistem komunikasi, kebisingan berlebihan, serta tegangan dan arus yang diinduksi oleh harmonik.

2.3 Filter Aktif Sebagai Filter Harmonisa

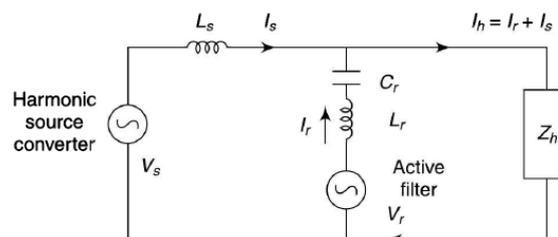
Filter aktif merupakan rangkaian elektronik yang memuat sebuah penguat dan beberapa devais lain seperti resistor dan kapasitor. Sebaliknya, filter pasif merupakan rangkaian yang hanya memuat beberapa devais pasif seperti resistor, kapasitor dan induktor. Penguat operasional sangat sering digunakan sebagai filter aktif. (Arrillaga & Watson, 2003)

Kompleksitas desain dan biaya tinggi serta keterbatasan kemampuan filter pasif konvensional dalam menghilangkan inter-harmonik dan harmonik non-karakteristik telah mendorong pengembangan kompensasi harmonisa dengan menggunakan perangkat elektronik daya, yang umumnya disebut sebagai filter aktif. Menurut koneksinya ke jaringan, filter aktif dapat berupa tipe seri, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a), untuk mencegah transfer arus harmonik, atau tipe *shunt*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b), untuk mengurangi harmonik dalam jaringan. (Arrillaga & Watson, 2003)



Gambar 3 filter aktif (a) Seri, (b) Paralel
Sumber: Arrillaga & Watson, 2003

Prinsip yang digunakan dalam filter aktif adalah bahwa filter tersebut menghasilkan arus harmonisa dan menyuntikkannya ke dalam sirkuit dalam arah yang berlawanan. Representasi rangkaian ekuivalen dari sumber harmonisa (konverter) bersama dengan filter aktif ditunjukkan dalam Gambar 4 (Kamakshaiah & Kamaraju, 2011):



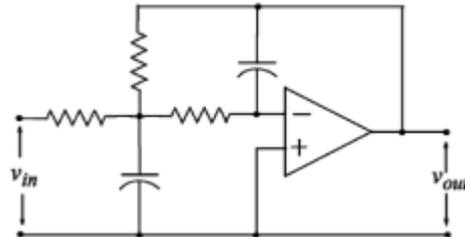
Gambar 4 Rangkaian ekuivalen sumber harmonik dan filter aktif
Sumber: Kamakshaiah & Kamaraju, 2011

V_S adalah sumber harmonisa yang menghasilkan tegangan dan menggerakkan arus I_S . Filter aktif melalui rangkaian yang disetel L_r, C_r menyuntikkan arus I_r ke arah yang berlawanan, sehingga arus harmonisa bersih dikurangi menjadi minimum di dalam jaringan Z_h (beban). Dengan demikian, filter aktif menekan arus harmonisa yang dihasilkan. Keunggulan dan Manfaat Filter Aktif AC dan DC (Kamakshaiah & Kamaraju, 2011):

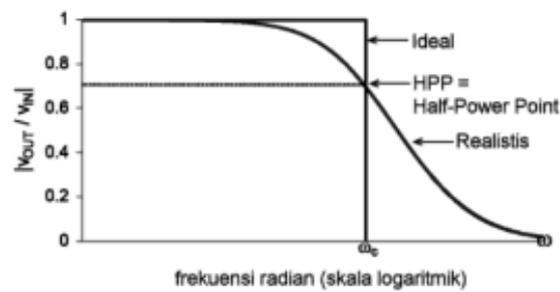
1. Kemampuan untuk melacak frekuensi sistem dan memfilter beberapa harmonisa secara bersamaan: Filter aktif dapat menyesuaikan diri dengan perubahan frekuensi sistem dan secara efektif menyaring beberapa harmonisa secara bersamaan, memberikan kemampuan mitigasi harmonik yang serbaguna.
2. Kinerja yang unggul meskipun detuning filter pasif: Filter aktif tetap mempertahankan kinerja tinggi bahkan jika filter pasif menjadi detuning, memastikan kompensasi harmonik yang konsisten terlepas dari variasi dalam sistem.
3. Adaptasi mudah ke filter pasif yang sudah ada: Filter aktif dapat diintegrasikan dengan filter pasif yang sudah ada, memungkinkan peningkatan dan perbaikan sistem mitigasi harmonik tanpa perlu modifikasi yang ekstensif.
4. Frekuensi resonansi yang lebih rendah: Filter aktif meminimalkan kemunculan frekuensi resonansi dengan mengurangi interaksi dengan impedansi jaringan, komponen filter lainnya seperti kapasitor dan reaktor, yang menghasilkan stabilitas dan keandalan sistem daya yang lebih baik.
5. Memenuhi persyaratan kinerja harmonik yang ketat: Filter aktif mampu mencapai tingkat kinerja harmonik tertinggi yang diperlukan untuk mengatasi masalah lingkungan di daerah padat seperti kota metropolitan dan mega, memastikan kepatuhan peraturan dan meminimalkan dampak negatif pada jaringan listrik dan infrastruktur sekitarnya.

Filter aktif merupakan rangkaian elektronik yang memuat sebuah penguat dan beberapa devais lain seperti resistor dan kapasitor, filter pasif merupakan rangkaian yang hanya memuat beberapa davais pasif seperti resistor, kapasitor dan induktor. Penguat operasional sangat sering digunakan sebagai filter. (Sianipar, 2015). Filter *low-pass* (pelewat rendah) melewatkan semua frekuensi di bawah frekuensi kritis

(*cut off*) yang ditandai sebagai ω_c dan mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di atas frekuensi *cut off*. Sebuah filter *low-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 5 dan respon frekuensinya pada Gambar 6.



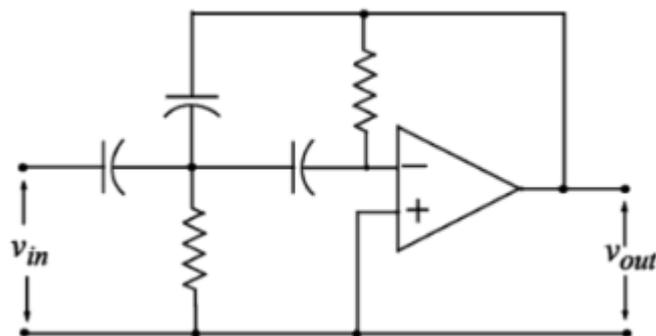
Gambar 5 Filter aktif *low-pass*



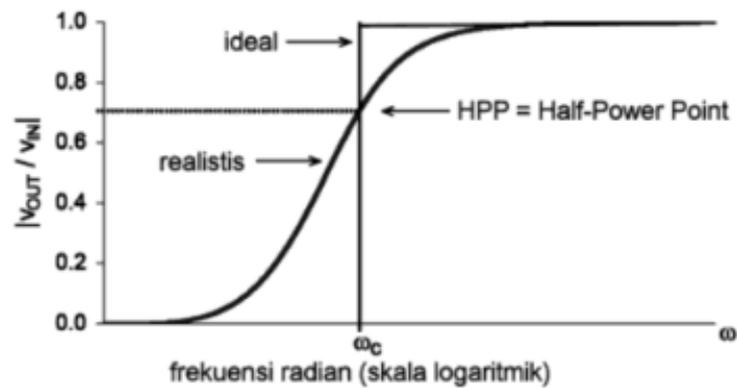
Gambar 6 Respon frekuensi filter *low-pass*

Sumber: Sianipar, 2015

Filter *high-pass* melewati semua frekuensi di atas frekuensi kritis (*cut off*) yang ditandai sebagai ω_c dan mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di bawah frekuensi *cut off*. Sebuah filter *high-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 7 dan respon frekuensinya pada Gambar 8.

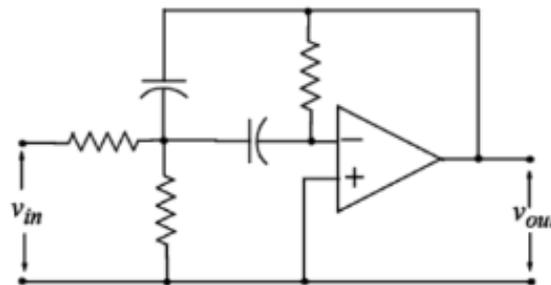


Gambar 7 Filter aktif *high-pass*

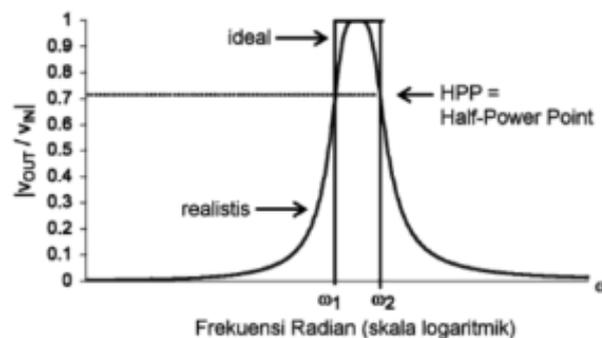


Gambar 8 Respon frekuensi filter *high-pass*
Sumber: Sianipar, 2015

Filter *band-pass* melewati rentang frekuensi di antara frekuensi kritis (*cut off*) yang ditandai sebagai ω_1 dan ω_2 , Dimana nilai maksimum dari v_{out}/v_{in} bernilai satu, yang merupakan $0,707 \times G_v$. Filter ini mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di luar rentang ini. Sebuah filter *band-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 9 dan respon frekuensinya pada Gambar 10.



Gambar 9 Filter aktif *band-pass*
Sumber: Sianipar, 2015



Gambar 10 Respon frekuensi Filter *band-pass*
Sumber: Sianipar, 2015

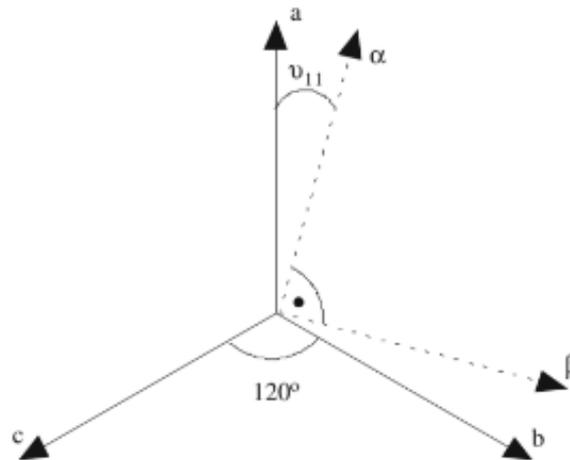
2.3.1 Teori PQ

Teori p-q didasarkan pada serangkaian daya instan yang didefinisikan dalam domain waktu. Tidak ada pembatasan yang diberlakukan pada bentuk gelombang tegangan atau arus, dan teori ini dapat diterapkan pada sistem tiga fase dengan atau tanpa kawat netral untuk bentuk gelombang tegangan dan arus tiga fase secara umum. Oleh karena itu, teori ini berlaku tidak hanya dalam kondisi tunak, tetapi juga dalam kondisi transien. (Akagi, 2007)

Konsep-konsep daya tradisional lainnya dicirikan dengan memperlakukan sistem tiga fase sebagai tiga sirkuit fase tunggal. Teori p-q pertama-tama mengubah tegangan dan arus dari koordinat abc menjadi koordinat $\alpha\beta$, kemudian mendefinisikan daya instan pada koordinat ini. Oleh karena itu, teori ini selalu mempertimbangkan sistem tiga fase sebagai satu kesatuan, bukan sebagai superposisi atau penjumlahan dari tiga sirkuit fase Tunggal. (Akagi, 2007)

Teori p-q sendiri merupakan teori yang berdasarkan perhitungan dari daya aktif dan reaktif dalam domain waktu. Teori ini menggunakan sistem tiga phase tanpa mempertimbangkan netral. Daya aktif dan reaktif diperoleh dengan cara mengukur nilai arus dan tegangan dari beban yang mengandung harmonisa yang dijadikan sebagai parameter dalam membangkitkan arus kompensasi. Besaran tegangan dan arus tiga fasa hasil pengukuran dalam koordinat abc akan ditransformasikan menjadi koordinat $\alpha\beta$ menggunakan transformasi clarke. (Akagi, 2007)

Teori p-q menggunakan transformasi $\alpha\beta$, yang juga dikenal sebagai transformasi Clarke, yang terdiri dari matriks nyata yang mengubah tegangan dan arus tiga fase menjadi kerangka acuan stasioner $\alpha\beta$. Oleh karena itu, presentasi teori p-q akan dimulai dengan transformasi ini, diikuti oleh teori itu sendiri, makna fisik dan interpretasinya, serta perbandingannya dengan teori daya konvensional.



Gambar 11 Ilustrasi dari transformasi abc to $\alpha\beta$
Sumber: (Benysek, 2012)

Transformasi $\alpha\beta 0$, atau transformasi Clarke, memetakan tegangan instan tiga fase pada fase abc, yaitu v_a , v_b , dan v_c , menjadi tegangan instan pada sumbu $\alpha\beta 0$, yaitu v_α , v_β , dan v_0 .

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Demikian pula, arus saluran tiga fase i_a , i_b dan i_c dapat ditransformasikan ke sumbu $\alpha\beta 0$ menggunakan *transformasi clarke* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Salah satu keuntungan dari penerapan transformasi $\alpha\beta 0$ adalah kemampuannya untuk memisahkan komponen urutan nol dari komponen fase abc. Sumbu α dan β tidak memberikan kontribusi terhadap komponen urutan nol. Dalam sistem tiga fase, tiga kawat, tidak ada arus urutan nol yang muncul, sehingga i_0 dapat dihilangkan dari persamaan di atas, yang menghasilkan penyederhanaan. Jika tegangan tiga fase seimbang dalam sistem empat kawat, tidak ada tegangan urutan

nol yang muncul, sehingga v_0 juga dapat dihilangkan. Namun, ketika komponen tegangan dan arus urutan nol hadir, transformasi lengkap harus dipertimbangkan.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Demikian pula, arus saluran tiga fase i_a , i_b dan i_c dapat ditransformasikan ke sumbu $\alpha\beta$ menggunakan *transformasi clarke* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)

Lebih dari setengah abad, PID telah menjadi tulang punggung keberhasilan pengontrolan beragam variabel proses industri. Kontrol PID dapat dijumpai hampir pada setiap industri yang bergerak dalam bidang proses. Menurut sebuah survey dinyatakan bahwa 97% industri yang bergerak dalam bidang tersebut menggunakan PID dalam pengontrolannya. (Setiawan, 2008)

Luasnya penggunaan kontrol PID pada dasarnya dilatarbelakangi beberapa hal, diantaranya (Setiawan, 2008):

1. Kesederhanaan struktur kontrol: Selain hanya ada tiga parameter utama yang perlu diatur atau dilakukan usaha penalaan (tuning), pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap dinamika pengontrolan secara intuitive mudah dipahami oleh operator.
2. Kontrol PID memiliki sejarah yang panjang. Dalam hal ini PID telah digunakan jauh sebelum era digital berkembang (yaitu sekitar tahun 1930-an).
3. Kontrol PID dalam banyak kasus telah terbukti menghasilkan unjukkerja relative memuaskan, baik digunakan sebagai sistem Regulator (sistem kontrol dengan *Setpoint* konstan dan beban cenderung berubah-ubah) maupun sebagai sistem Servo (sistem kontrol dengan *Setpoint* yang berubah dan beban cenderung konstan).

Struktur control PID idela dikenal juga dengan nama sturktur PID Tipe A atau struktur PID Paralel atau struktur PID non-interacting. Struktur ini adalah struktur PID yang umum ditemukan pada Sebagian besar buku-buku teks kontrol. Persamaan (12) dan (13) berikut memperlihatkan bentuk umum PID ideal:

$$CO(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

atau

$$CO(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^1 e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

dengan $CO(t)$: output kontroler

$e(t)$: selisih antara SetPoint dengan nilai output proses (dengan menganggap proses yang di control bersifat direct maka $e = SP - PV$)

K_p : gain proporsional

T_i : time integral

T_D : time derivative

K_i : gain integral (K_p/T_i)

K_D : gain gerivative ($K_p \cdot T_D$)

Walaupun secara teoritis nilai-nilai parameter kontrol PID besarnya dapat diatur secara independen, tetapi secara praktis (terutama terkait dengan model proses yang dikontrol), pengaturan atau tuning yang dilakukan terhadap salah satu parameter kontrol, umumnya memerlukan pengaturan ulang pada parameter yang lain. Sebagai contoh, untuk sebuah model proses tertentu, pengubahan nilai KP (diperbesar atau diperkecil) umumnya akan memerlukan setting ulang pada besaran parameter kontrol KI (atau TI) dan KD (atau TD). Tabel 8 memperlihatkan pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap unjuk kerja pengontrolan proses secara umum. (Setiawan, 2008)

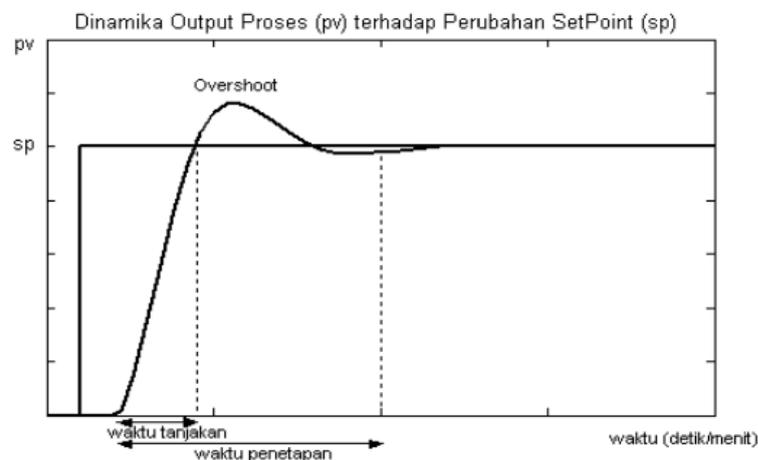
Tabel 8 Pengaruh tuning salah satu Parameter PID terhadap unjuk kerja proses

	Waktu Tanjakan	Overshoot	Waktu Penetapan	Kestabilan
Pembesaran K_p	Berkurang	Bertambah	Sedikit bertambah	menurun
Pembesaran K_I (Pengecilan T_I)	Sedikit berkurang	Bertambah	Bertambah	Menurun
Pembesaran K_D (Pengecilan T_D)	Sedikit berkurang	Berkurang	berkurang	Meningkat

Sumber: Setiawan, 2008

Dalam bentuknya yang ideal, parameter unjuk kerja yang nampak pada Tabel 8 diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

- **Waktu tanjakan:** Waktu yang diperlukan respon (deviasi output variable proses) untuk naik dari 0 sampai 100% harga akhirnya.
- **Overshoot:** Lonjakan maksimum yang dialami oleh respon proses.
- **Waktu penetapan:** Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap disekitar 95%-98% dari harga akhirnya.



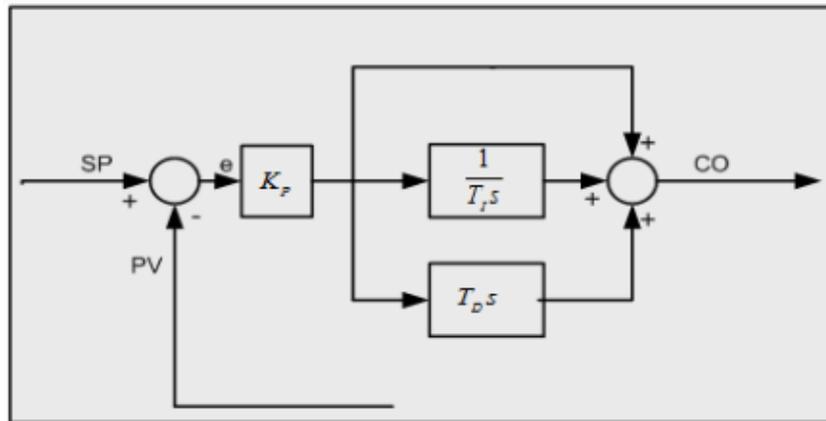
Gambar 12 Respon proses sebagai akibat perubahan SetPoint

Sumber: Setiawan, 2008

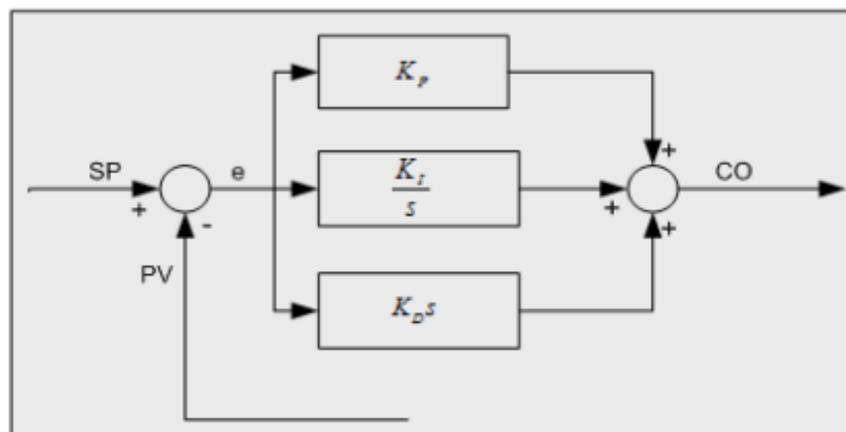
Aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan komponen komponen dasar kontrol PID:

1. Kontrol Proporsional: berfungsi untuk mempercepat respon
2. Kontrol Integral: berfungsi untuk menghilangkan error steady
3. Kontrol Derivative: berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

Gambar 13 berikut berturut-turut memperlihatkan blok diagram kontrol PID ideal bentuk dependent dan bentuk independent;



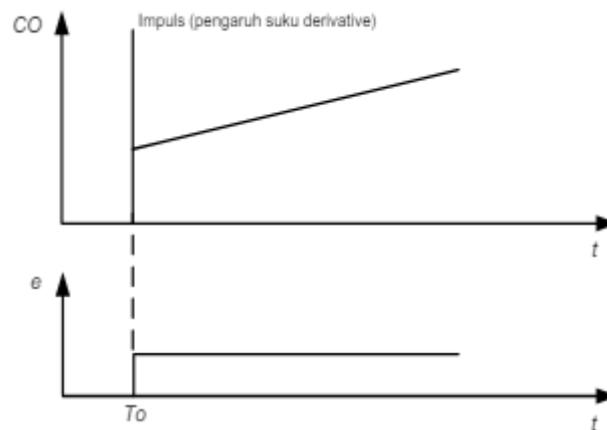
(a)



(b)

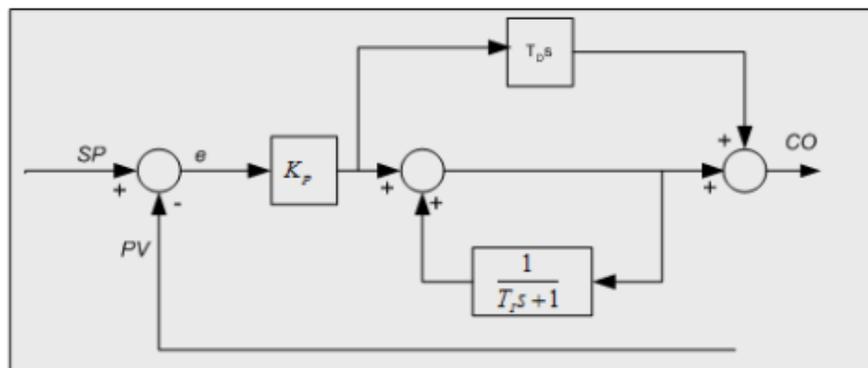
Gambar 13 Diagram blok kontrol PID ideal
(a) bentuk dependent, (b) bentuk independent
Sumber: Setiawan, 2008

Seperti yang terlihat pada Gambar 12 diatas diatas, semua komponen pada kontroler PID jenis ideal ini bekerja pada masukan error penggerak. Hubungan antara masukan error penggerak dengan output kontroler PID tersebut dapat dilihat pada Gambar 14:



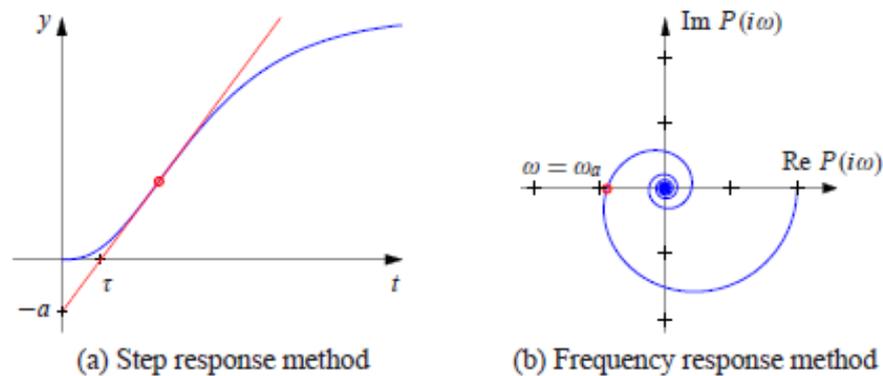
Gambar 14 Aksi kontrol PID
Sumber: Setiawan, 2008

kontrol PID ideal juga dapat direalisasikan dengan mengacu pada Gambar 15;



Gambar 15 Diagram blok alternatif kontrol PID
Sumber: Setiawan, 2008

Untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan maka perlu ditentukan besar parameter-parameter dari pengendali PID yang dapat dilakukan dengan tuning PID. Terdapat beberapa jenis metode tuning yaitu metode trial and error, metode Ziegler-Nichols dan metode Cohen-coon. Pada penelitian ini digunakan metode Ziegler-Nichols. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942. Ziegler dan Nichols mengembangkan dua metode penyetelan pengendali berdasarkan karakterisasi sederhana dari dinamika proses dalam domain waktu dan frekuensi. (Astrom & Murry, 2009)



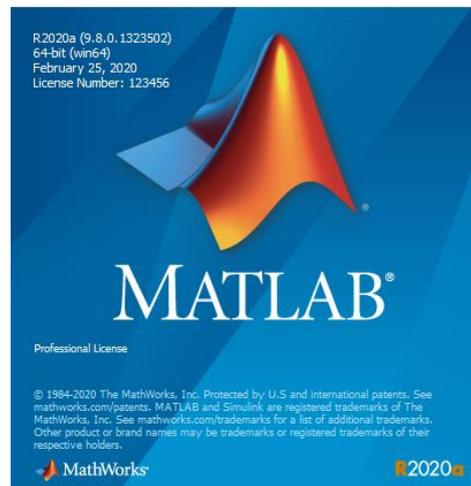
Gambar 16 Metode respons langkah dan frekuensi Ziegler–Nichols.
Sumber: Astrom & Murry, 2009

Proses pemilihan parameter pengontrol untuk memenuhi spesifikasi kinerja yang diberikan dikenal sebagai penyetelan pengontrol. Ziegler dan Nichols menyarankan aturan penyetelan pengendali PID (artinya menetapkan nilai K_p , T_i dan T_d) berdasarkan langkah percobaan tanggapan atau berdasarkan nilai K_p yang menghasilkan stabilitas marginal bila hanya proporsional tindakan kontrol digunakan. (Ogata, 2010)

Salah satu metode penyetelan yang dikemukakan oleh Ziegler dan Nichols didasarkan pada suatu proses informasi dalam bentuk *open loop* langkah respon yang diperoleh dari a tes mendadak. Metode ini dapat dipandang sebagai metode tradisional berdasarkan pemodelan dan kontrol di mana model proses yang sangat sederhana digunakan (Astrom, 2002). Metode domain waktu didasarkan pada pengukuran sebagian dari tanggapan langkah unit *loop* terbuka proses, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 16 (a). Tanggapan langkah diukur dengan memberikan masukan langkah unit ke proses dan merekam tanggapannya. Tanggapan ini ditandai dengan parameter a dan τ , yang merupakan intersep dari tangen tercuram dari tanggapan langkah dengan sumbu koordinat. Parameter τ adalah perkiraan dari tunda waktu sistem dan a/τ adalah kemiringan tercuram dari tanggapan langkah. Perhatikan bahwa tidak perlu menunggu hingga mencapai steady state untuk menemukan parameter, cukup menunggu sampai tanggapan telah mencapai titik infleksi. Parameter pengendali diberikan dalam Tabel 9. Parameter-parameter tersebut diperoleh dengan simulasi ekstensif dari berbagai proses representatif. Sebuah pengendali disesuaikan secara manual untuk setiap proses, dan kemudian

2.5 Matlab *Simulink*

MATLAB merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang cukup populer pada kalangan ilmuwan dan praktisi. Dalam Matlab sudah terintegrasi kaitan komputasi, visualisasi dan pemrograman yang mudah digunakan dengan masalah dan solusi dapat diwujudkan dengan model matematika yang sudah umum digunakan. Secara mendasar Matlab telah banyak digunakan untuk berbagai bidang, seperti membentuk algoritma matematika dan komputasi, Pemodelan akuisisi data, simulasi, dan analisis prototif data, eksplorasi, dan pembuatan visualisasi grafis ilmu pengetahuan dan teknologi, termasuk untuk membuat sistem antar muka dengan perangkat lain.



Gambar 17 Aplikasi Matlab

Sumber: Penulis

Toolbox yang terdapat pada Matlab antara lain: *Signal Processing*, *Control System*, *System Identification*, *optimization*, *fuzzy*, *neural network* dan sebagainya. Selain *toolbox*, Matlab juga menawarkan produk yaitu *SIMULINK* suatu sistem untuk simulasi dinamika proses atau plant. *Simulink* adalah perangkat lunak yang interaksinya dalam lingkungan block diagram untuk simulasi multi domain dan *model-based design*. *Simulink* dapat mensupport *system level design*, Simulasi, *Automatic code generation*, dan *continuous test and verification embedded systems*. *Simulink* menyajikan tampilan editor dalam bentuk grafik. (Ningrum, 2020).

Simulink adalah perluasan grafis untuk MATLAB untuk pemodelan dan simulasi sistem. Dalam *Simulink*, sistem digambarkan di layar sebagai diagram blok. Banyak elemen dari diagram blok tersedia, seperti fungsi transfer, simpul

penjumlahan, dll., serta perangkat masukan dan keluaran virtual seperti generator fungsi dan osiloskop. Perangkat virtual ini akan memungkinkan Anda melakukan simulasi dari model yang akan Anda bangun. *Simulink* terintegrasi dengan MATLAB dan data dapat dengan mudah ditransfer antara program-program tersebut. Dalam tutorial ini, kami akan menerapkan *Simulink* pada contoh-contoh sistem yang dimodelkan, kemudian membangun pengendali, dan mensimulasikan sistem-sistem tersebut. (Ningrum, 2020).

2.6 Penelitian Terkait yang Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terkait yang terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Meskipun terdapat keterkaitan dalam pembahasan, penelitian yang diajukan ini masih sangat berbeda dengan penelitian terdahulu. Adapun beberapa penelitian terdahulu tersebut adalah:

1. “Perencanaan Filter Aktif Tiga Fasa Menggunakan Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID) untuk Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik” (2013). Penelitian ini membahas filter aktif tiga fasa menggunakan kontrol PID (Proportional Integral Derivative) sebagai kontrol yang sederhana untuk mengatasi permasalahan harmonisa pada sistem tenaga listrik. Filter aktif saat beroperasi, menginjeksikan arus kompensasi ke sistem tenaga listrik. Arus beban yang terdistorsi diinputkan pada kontrol filter dan menghasilkan arus trigger untuk inverter, dimana arus trigger ini menentukan besarnya arus kompensasi. Setelah dilakukan simulasi untuk membandingkan kondisi sistem sebelum pemasangan filter aktif, diperoleh THD (Total Harmonic Distortion) arus sebesar 34,91%, setelah pemasangan filter aktif dengan menggunakan kontrol PID, THD arus mengalami penurunan menjadi 11,157%.
2. “Pengaruh Filter Aktif Dengan Pengaturan Daya Reaktif Terhadap Efisiensi Trafo Berbasis *Simulink*” (2021). Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaturan daya reaktif pada filter aktif untuk mengetahui nilai efisiensi yang didapatkan dengan mengikuti nilai standar THDi IEEE 519 – 2014 sebesar 8 % untuk setiap phasanya. Hasil analisis pengaturan daya reaktif terkecil tetapi melebihi nilai efisiensi trafo pada saat kondisi eksisting dengan memenuhi standar IEEE 519 – 2014 adalah sebesar 30 % dengan nilai THDi untuk fasa R

= 7,54 %, S = 7,74 %, dan T = 7,37 % didapatkan nilai efisiensi sebesar 96,31 %

3. “Studi Analisis Pengaruh Filter Aktif Berbasis Fuzzy Logic Controller Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Beban Non-Linier” (2019). Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh filter aktif berbasis *fuzzy logic* untuk mengurangi overshooting. Hasil simulasi THDi saat kondisi eksisting pada fasa R, S, T; adalah sebesar 14%, 17%, 14%. Saat kondisi filter aktif tanpa kontrol, presentase THDi pada fasa R sebesar 6%, fasa S sebesar 6%, fasa T sebesar 4%. Pada kondisi filter aktif berbasis fuzzy logic controller presentase THDi pada fasa R, S, T; adalah 0,9%, 0,9, 1%. Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa filter aktif berbasis fuzzy logic controller mampu mereduksi distorsi harmonisa hingga nilai terendah, sehingga penggunaan fuzzy logic pada filter aktif dapat digunakan dalam proses filterisasi harmonisa pada sistem kelistrikan. hing pada inverter sehingga mencapai nilai THDi terendah.
4. “Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) Dengan Penambahan Filter Aktif Menggunakan Matlab” (2021). Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh harmonisa terhadap unjuk kerja motor induksi 3 fasa mencakup putaran dan torsi menggunakan filter aktif untuk menekan harmonisa. Adapun hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah menurunnya THDi tiap fasa setelah dipasang filter aktif, namun pemasangan filter aktif terhadap unjuk kerja motor.
5. “Simulasi Penggunaan Filter Aktif Shunt Dengan Kontrol PI Untuk Meredam Total Harmonic Distortion (THD) Pada Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana” (2023). Penelitian tersebut berfokus pada penggunaan filter aktif untuk meredam THD pada lokasi penelitian. Filter aktif yang digunakan adalah filter aktif *shunt* dengan kontrol PI yang terdiri dari rangkaian sumber tegangan inverter dan rangkaian kontrol. Adapun hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah penggunaan filter aktif *shunt* dengan kontrol PI menyebabkan penurunan THDi tiap fasa yaitu pada fasa R= 3,29%; S= 3,01%; dan T=4,53%.

Tabel 10 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terdahulu	Persamaan	Perbedaan
1	Perencanaan Filter Aktif Tiga Fasa Menggunakan Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID) untuk Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik (Odinanto, T., dkk. 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa - Penggunaan kontrol Proporsional Integral Drivative (PID) 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplikasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan PSIM sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan Matlab - Metode tuning PID pada penelitian ini menggunakan metode coba-coba atau <i>try and error</i> sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode tuning Ziegler–Nichols.
2	Pengaruh Filter Aktif Dengan Pengaturan Daya Reaktif Terhadap Efisiensi Trafo Berbasis <i>Simulink</i> (Dhinata, dkk. 2021)	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa - Penggunaan aplikasi Matlab 	<ul style="list-style-type: none"> - Penelitian ini melakukan pengaturan daya reaktif pada filter yang digunakan untuk mereduksi harmonisa dan pengaruhnya terhadap efisiensi trafo, sedangkan untuk penelitian yang di ajukan tidak mengatur daya reaktif.

3	Studi Analisis Pengaruh Filter Aktif Berbasis <i>Fuzzy Logic Controller</i> Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Beban <i>Non-Linier</i> (Saputra, dkk. 2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa - Penggunaan aplikasi Matlab 	- Penelitian ini menggunakan pengontrolan berbasis <i>fuzzy logic controller</i> ; sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan kontrol PID
4	Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) Dengan Penambahan Filter Aktif Menggunakan Matlab (Duarsuana, dkk. 2021)	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa - Penggunaan aplikasi Matlab 	- Penelitian ini menggunakan beban motor induksi 3 fasa sebagai beban non-linier serta menganalisa kinerja dari motor induksi 3 fasa tersebut, sedangkan pada penelitian yang di ajukan tidak menggunakan beban motor 3 fasa sebagai beban non linier.
5	Simulasi Penggunaan Filter Aktif Shunt Dengan Kontrol PI Untuk Meredam Total Harmonic Distortion (THD) Pada Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana (Yudha, dkk. 2023)	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa - Penggunaan aplikasi Matlab 	- Pada penelitian ini hanya menggunakan kontrol PI sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan kontrol PID